

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
институт  
Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
В.Е. Косенко  
подпись инициалы, фамилия  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

«Технология изготовления деталей и сборочных единиц из композиционных  
материалов для антенн многофункциональных космических аппаратов»  
тема

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных  
производств»  
код и наименование направления

15.04.05.02 «Технология космических аппаратов»  
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель	_____	доцент МБК ПФиКТ канд. физ.-мат. наук _____	А.А. Хвалько _____
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		С.С. Кочеткова _____
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	начальник группы, цех 039 АО «ИСС» _____	В.Е. Чичурин _____
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Нормоконтроле р	_____		Е.С. Сидорова _____
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Красноярск 2019

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Межинститутская базовая кафедра

«Прикладная физика и космические технологии»

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ В.Е. Косенко

подпись

инициалы, фамилия

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**в форме магистерской диссертации**

Студенту Кочетковой Светлане Степановне.

Группа МТ17-04 М направление (специальность) 15.04.05

«Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Тема выпускной квалификационной работы: «Технология изготовления деталей и сборочных единиц из композиционных материалов для антенн многофункциональных космических аппаратов».

Утверждена приказом по университету № 15408/с от 24.10.17

Руководитель ВКР: Александр Александрович Хвалько, доцент МБК ПФиКТ, канд. физ-мат. наук.

Исходные данные для ВКР: по заданным параметрам разработать технологию изготовления опоры из композиционных материалов для антенн многофункциональных космических аппаратов.

Перечень разделов ВКР:

1 Литературный обзор современных технологий производства антенн из композиционных материалов для космических аппаратов.

2 Исследовательская часть.

3 Изготовление силовой опоры рефлектора.

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_ А.А. Хвалько  
подпись                      инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ С.С. Кочеткова  
Подпись инициалы и фамилия студента

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «Технология изготовления деталей и элементов конструкций антенн из композиционных материалов для многофункциональных космических аппаратов» содержит 87 страниц текстового документа, 28 использованных источников, 40 иллюстраций, 22 таблицы.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ, ПРЕЦИЗИОННЫЕАНТЕННЫ,  
КОМПОЗИЦИОННЫЕМАТЕРИАЛЫ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ  
ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ, УДАЛЯЕМАЯ ОСНАСТКА.

В настоящий момент в космической отрасли широко применяются композиционные материалы. Данные материалы позволяют удовлетворять возрастающие требования к конструкциям антенн космических аппаратов, такие как прочность и жесткость при минимальной массе, увеличение срока службы космических аппаратов, повышение формостабильности элементов. Целью данной работы является разработка технологии изготовления опоры антенны сложной замкнутой формы с применением технологии вытравляемой оснастки и поэтапной полимеризацией.

В работе рассмотрены общие сведения по технологиям изготовления деталей и элементов конструкций антенн, рассмотрены факторы, влияющие на технологические параметры при их изготовлении. Рассмотрена конструкция и технология изготовления удаляемой оправки, определена возможность применения режима с предварительной полимеризацией, выявлено влияние химического удаления приспособления на физико-химические свойства готового изделия, дано описание рефлектора и силовой опоры. Приведены результаты испытаний. Для силовой опоры была разработана технология изготовления, проведено термоциклирование и обмер опоры до и после термоциклирования. Результаты обмера приведены в таблицах.

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 Литературный обзор современных технологий производства антенн из композиционных материалов для космических аппаратов.....	9
1.1 Космические аппараты.....	9
1.2 Бортовые антенны.....	15
1.3 Технологические проблемы создания формостабильных композитных конструкций.....	20
1.4 Факторы, связанные с особенностью технологии изготовления прецизионных конструкций.....	21
1.5 Факторы влияния технологических параметров процесса на формостабильность конструкций..	22
1.6 Этапы создания конструкций из композиционных материалов.....	24
1.7 Факторы, влияющие на выбор материалов и применяемые материалы.....	26
1.8 Методы формования изделий из композиционных материалов.....	30
1.9 Отверждение композиционных материалов.....	32
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	39
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	41

## ВВЕДЕНИЕ

С начала 70-х годов развитие космонавтики характеризуется все более широким ее проникновением в различные сферы практической деятельности человечества и использованием космической техники для решения самых разнообразных прикладных задач. Исследование природных ресурсов и метеорология, навигация и геодезия, системы связи и технология – вот далеко не полный перечень областей, в которых применяются новейшие достижения ракетно-космической техники и космического приборостроения[1].

На данный момент в космостроении уже возникают новые грандиозные проекты, такие как создание солнечных космических электростанций мощностью 5 – 10 ГВт, площадь солнечных батарей которых составит десятки квадратных километров, а масса десятки тысяч тонн, монтаж на околоземных орбитах производственно-технологических комплексов и изготовление уникальных по своим возможностям радиоастрономических обсерваторий, например, российской космической обсерватории «Миллиметрон».

В условиях, когда космонавтика становится важной составной частью рыночной экономики, особое значение приобретают вопросы рентабельности, экономической эффективности использования и конкурентоспособности космической техники. В связи с тем, что стоимость эксплуатации космических аппаратов значительно ниже стоимости разработки и вывода его на орбиту, важной задачей становится увеличение срока службы космических аппаратов. Уже сейчас ставятся задачи по надежному функционированию космических аппаратов на орбите в течение 10 лет и более, а для проектируемых солнечных электростанций, учитывая затраты на их изготовление (15 – 40 млрд. долл., по оценкам зарубежных специалистов), срок службы должен составлять 20 – 30 лет.

Одну из главных ролей в обеспечении длительной и безотказной работы космических аппаратов играет стойкость конструкционных материалов и элементов аппаратуры космических аппаратов к воздействию внешних

факторов. На космический аппарат воздействует целый комплекс факторов космической среды: глубокий вакуум, корпускулярные и электромагнитные излучения разных видов, метеороиды, невесомость и т. д. Космические аппараты, предназначенные для исследования планет, и вовсе могут оказываться в весьма специфических условиях.

При эксплуатации космических антенн, платформ и других элементов прецизионной аппаратуры, основным требованием, определяющим работоспособность конструкции, является сохранение заданных размеров при изменении характеристик окружающей среды, и в первую очередь – температуры.

Известно, что конструкции космических аппаратов, такие как панели корпуса, рефлектора антенн, должны обладать повышенной формостабильностью в условиях периодических теплосмен, вызванных движением через теневые участки орбиты. В настоящее время потребность в высокоточных, формостабильных и легких параболических рефлекторах возрастает. Это обусловлено переходом от длин волн дециметрового и сантиметрового диапазона к энергетически более выгодным длинам волн миллиметрового диапазона при передаче информации. При работе в коротковолновом диапазоне возможно также достижение лучших эксплуатационных характеристик антенн.

Высокие требования к точности изготовления элементов антенных устройств и сохранению этой точности в процессе эксплуатации радиоэлектронных комплексов определяют необходимость разработки и применения перспективных конструкционных материалов, прогнозирования их физико-механических свойств в процессе эксплуатации изделия.

По этой причине и возник закономерный интерес как отечественных, так и зарубежных космических фирм к новым конструкционным материалам, обладающим низкой температурной деформируемостью. Такими материалами являются инварные сплавы и углепластик. Если инварные сплавы имеют плотность  $\approx 8$  г/см<sup>3</sup>, то этот параметр у углепластика составляет  $\approx 1,45$  г/см<sup>3</sup>. К

тому же этот материал обладает высокими упруго-прочностными характеристиками. Именно эти свойства углепластика позволяют использовать его в формостабильных конструкциях космических аппаратов [2]. Однако опыт показывает, что высокие потенциальные возможности волокнистых композиционных материалов не всегда реализуется в конструкциях с рассчитываемым эффектом. Это случается по ряду причин: несовершенных методов расчета, проектирования и технологии изготовления, недостаточного учета особенностей поведения композиционных материалов при изготовлении и при эксплуатации. Технологические проблемы создания эффективных крупногабаритных космических конструкций из композиционных материалов становятся первоочередной задачей, которая лучше всего разрешается при совместном рассмотрении вопросов синтеза композиционных материалов, расчетов на прочность и деформативность, определения размеров конструкции и разработки технологических процессов для ее изготовления.

Задачи:

- подтвердить возможность применения режима с неполной предварительной полимеризацией;
- определить влияние процесса вытравливания оправки на физико-химические свойства композиционных материалов;
- отработать технологию изготовления деталей замкнутой формы из композиционных материалов;
- определить значения физико-механических характеристик материала опоры.



# **1 Литературный обзор современных технологий производства антенн из композиционных материалов для космических аппаратов**

## **1.1 Космические аппараты**

За более чем полувековой период с момента запуска первого искусственного спутника Земли было создано большое количество многофункциональных космических аппаратов, которые классифицируются последующим признакам [3,4,5,6].

По принадлежности и способу применения:

- народнохозяйственные (национальные и международные);
- военные;
- коммерческие (национальные и международные).

По назначению:

- научно-исследовательские;
- специального назначения;
- информационного обеспечения.

Одной из наиболее обширных и важных областей применения космических аппаратов является информационное обеспечение. Невозможно, используя только один космический аппарат, обеспечить надежную и непрерывную передачу данных потребителю, поэтому космические аппараты объединяют в космические системы информационного обеспечения.

Космические системы информационного обеспечения делятся на [7]:

- космические системы связи, телевещания и ретрансляции;
- космические системы навигации и времени;
- космические системы управления движением;
- геодезические космические системы;
- космические системы дистанционного зондирования Земли.

Две трети российских космических аппаратов спроектированы и произведены в компании «Информационные спутниковые системы»,

являющемся ведущим российским предприятием по созданию космических аппаратов. Сегодня в акционерном обществе «Информационные спутниковые системы» освоено несколько спутниковых орбит [8]: низкая околоземная, средняя круговая и геостационарная.

На сегодняшний день на предприятии выпускаются спутники персональной связи, работающие на низкой околоземной орбите[9]. Низкая околоземная орбита (1500 км) не требует установки на космических аппаратах мощных передатчиков. Спутники имеют относительно небольшие размеры и невысокую стоимость изготовления. Представителем семейства таких космических аппаратов является ГОНЕЦ-М, изображенный на рисунке 1, способный решить следующие прикладные задачи:

- контроль состояния и местоположения подвижных транспортных средств и грузов;
- экологический, промышленный и научный мониторинг;
- связь в удаленных регионах с неразвитой инфраструктурой;
- связь в чрезвычайных ситуациях;
- организация глобальных ведомственных и корпоративных сетей передачи данных;
- создание пейджинговых систем.



Рисунок 1 – аппарат «Гонец-М»

Компания акционерное общество «Информационные спутниковые системы» является крупнейшим изготовителем телекоммуникационных космических аппаратов. Данный класс аппаратов обеспечивают доступ в Интернет, телевидение, связь. Космические аппараты выпускаются на базе унифицированных спутниковых платформ «Экспресс-1000» и «Экспресс-2000» и отличаются друг от друга пропускной способностью, мощностью и размерностью.

Космический аппарат «Экспресс-АМ8», изображенный на рисунке 2, предназначен для обеспечения телекоммуникационных услуг в России и странах Европы, Африки, Северной и Южной Америки, предоставления президентской и правительственной связи.

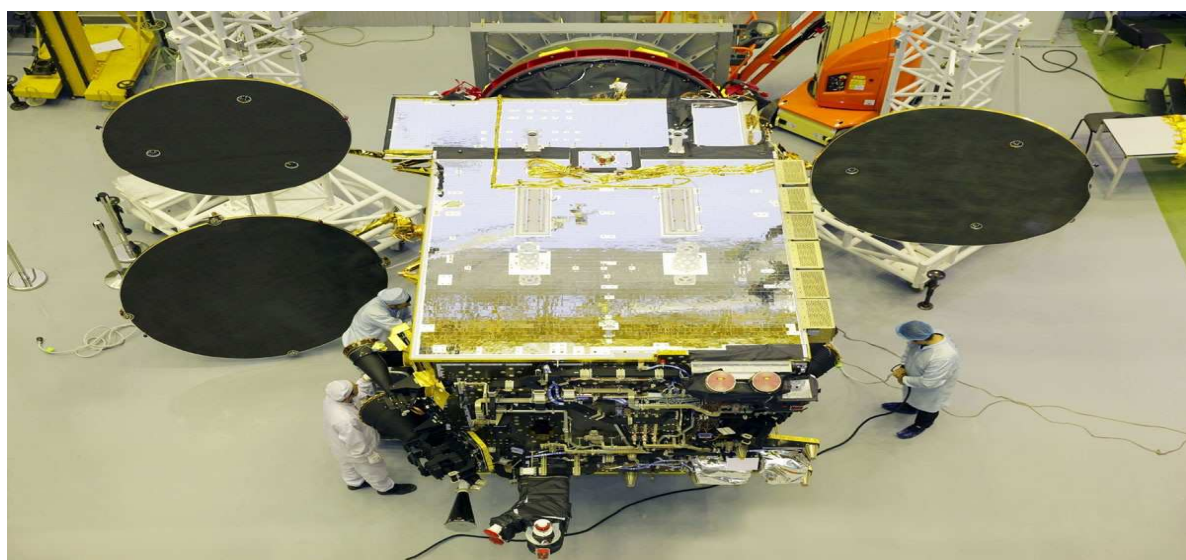


Рисунок 2 – Космический аппарат «Экспресс-АМ8»

Космический аппарат «Экспресс-АМ5» обеспечивает цифровое теле – и радиовещание для территории России, подвижную президентскую и правительственную связь, а также телефонию, видеоконференцсвязь, доступ в Интернет. На борту аппарата установлено 10 антенн, 84 транспондера C-, Ku-, Ka-, L- диапазона.

Телекоммуникационный спутник «Экспресс-АМ6», изображенный на рисунке 3, обеспечивает доступ к многопрограммному цифровому теле – и радиовещанию, к Интернету в любой точке страны. В состав входит 11 антенн, 72 активных транспондера С-, Ku-,Ka-, L- диапазона. Срок активного существования составляет 15 лет. «Экспресс-АМ5» и «Экспресс-АМ6» изготовлены на базе унифицированной спутниковой платформы «Экспресс-2000».

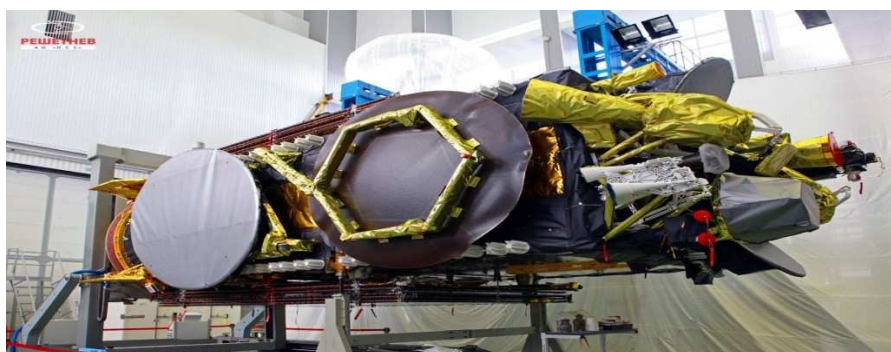


Рисунок 3 – Космический аппарат «Экспресс-АМ6»

Для территории Дальнего Востока был разработан телекоммуникационный спутник «Экспресс-АТ2», показанный на рисунке 4, он предназначен для телевизионного вещания высокой четкости, услуг фиксированной и мобильной связи, высокоскоростного доступа в Интернет.

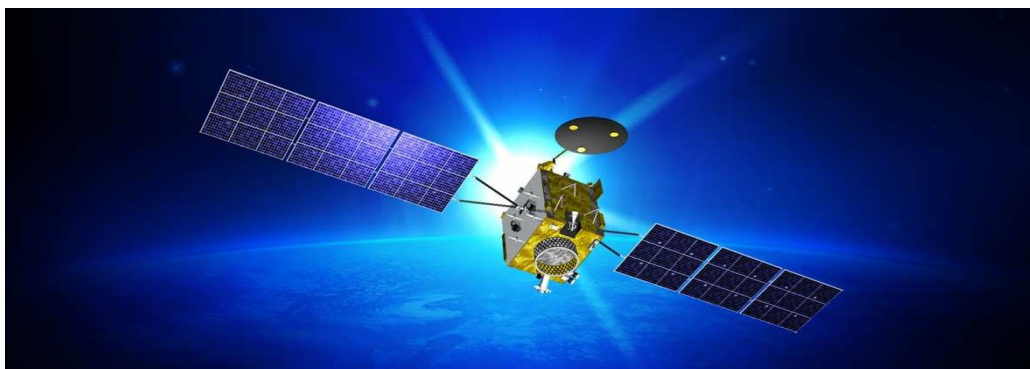


Рисунок 4 – Космический аппарат «Экспресс-АТ2»

Представителем средней круговой орбиты является семейство перспективных космических аппаратов ГЛОНАСС [7,8]. Навигационная систем ГЛОНАСС состоит из 24-х рабочих и 2-х резервных космических аппаратов, располагающихся на высоте 19100 км и обеспечивают навигационной информацией и сигналами точного времени наземных, морских, воздушных и космических потребителей. Аппараты этого типа непрерывно излучают четыре навигационных сигнала с частотным разделением в двух частотных диапазонах – L1 и L2. Работая в составе 24 космических аппаратов «Глонасс-М», изображенных на рисунке 5, российская глобальная навигационная спутниковая система обеспечивает определение местоположения объектов с точностью порядка 5 метров для гражданских потребителей.



Рисунок 5 – Космический аппарат «Глонасс-М», «Глонасс-К»

«Глонасс-К» – перспективные космические аппараты Глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС. По сравнению со спутниками «Глонасс-М» обладают улучшенными техническими характеристиками и увеличенным сроком активного существования, помимо излучения навигационных сигналов с частотным разделением в диапазонах L1 и L2, будут также излучать гражданский навигационный сигнал с кодовым разделением в диапазоне L3. Что позволит до десятков сантиметров повысить точность навигационных определений. Наибольшее внимание уделяется освоению геостационарной орбиты (35798 км). Представителями космических аппаратов, базирующихся на геостационаре, являются семейства ЭКСПРЕСС, ЯМАЛ,



показанный на рисунке 6, ЛУЧ, предоставляющие услуги президентской и правительственной связей, теле- и радиовещания, доступ к сети интернет на территориях России, в странах Европы, Африки, Южной и Северной Америки.



Рисунок 6– Космический аппарат «Ямал- 300К»

Компания «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» отвечает за создание космической геодезической системы нового поколения на базе космических аппаратов «ГЕО-ИК-2», показанный на рисунке 7. Они позволяют проводить геодезические измерения высокой точности и тем самым обеспечить потребности российской науки в обновлении картографической модели Земли и уточнении ее геофизических параметров. Орбитальная группировка системы будет состоять из двух спутников.



Рисунок 7 – Космический аппарат «ГЕО-ИК-2»

Несмотря на разнообразие выпускаемых космических аппаратов их объединяет присутствие в составе важного элемента. Для выполнения поставленных перед ними задач, в их составе должны присутствовать бортовые антенны, количество которых, в зависимости от функционального назначения аппарата, может достигать больше десяти.

## **1.2 Бортовые антенны**

Бортовые антенны используют в системах связи, в радиотелеметрических системах, в командных линиях, системах стыковки двух КА, траекторных измерениях и т.д. [10]. Антенна – радиотехническое устройство, предназначенное для излучения и ли приема электромагнитных волн. Высокочастотные электромагнитные колебания преобразуются передающей антенной в электрические волны и излучаются в пространство. Электромагнитные волны передаются от передатчика к антенне при помощи линии питания – фидера. Вдоль фидера распространяются плоские электромагнитные волны, которые передающая антенна преобразует в свободные сферические волны, распространяемые в пространстве. Приемная антенна улавливает сферические волны и преобразует их в связанные волны, передаваемые с помощью фидерной линии в приемник.

По назначению антенны делят на передающие и приемные. Но существуют антенны, работающие как на прием, так и на передачу.

По принципу действия антенны разделяют на линейные и апертурные, на их базе возможно создание более сложных антенных систем.

Линейные антенны:

- тонкий металлический провод, с возбужденным в нем переменным электрическим током;
- узкая щель в металлическом экране, между краями которой приложено электрическое переменное напряжение;
- спиралевидные щели и спиральные антенны.

Линейные антенны формируют широкую диаграмму направленности [11]. Наибольшее распространение в качестве линейных антенн получили спиральные антенны: цилиндрические и конические, изображенные на рисунках 8а и 8б.

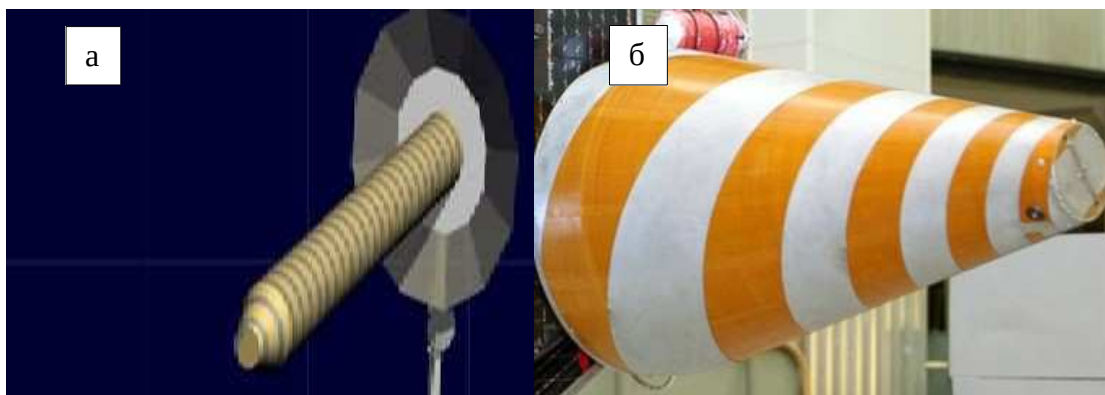


Рисунок 8 – цилиндрическая антенна(а), конусная антенна(б)

Апертурные антенны:

- рупорные;
- зеркальные параболические;
- линзовые;
- открытые волноводы;
- антенны поверхностных волн.

Спутниковые антенны отличаются частотным диапазоном, направленностью диаграммы, необходимостью сканирования диаграммы.

На предприятии акционерное общество «Информационные спутниковые системы» проектируют и изготавливают различные виды антенн, такие как разворачиваемые антенны зонтичного типа, зеркальные параболические антенны со сплошным рефлектором, рупорные антенны, антенные решетки. Так как антенны составляют немалую часть космического аппарата, то масса антенны имеет важное значение, второй фактор это формостабильность антенн и элементов, составляющих конструкцию антенны. Поэтому на предприятии



широко применяют композиционные материалы, позволяющие снизить массу конструкции и повысить формостабильность. Так из композитов изготавливаются следующие типы антенн и элементов конструкции антенн:

- рупорные, изображенные на рисунке 9;



Рисунок 9 – Рупорные антенны

- изогридный рупор, показанный на рисунке 10;



Рисунок 10 – Изогридный рупор

- точностные спицы для зонтичных антенн;
- рефлектора и контррефлектора, представленные на рисунке 11а,б;

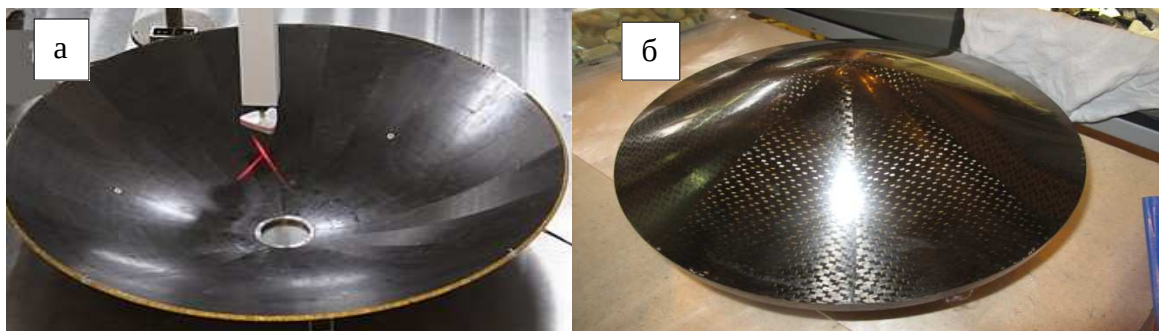


Рисунок 11 – Рефлектор (а), контррефлектор (б)

- элементы выдвижных штанг, показанные на рисунке 12;



Рисунок 12 – Элементы выдвижных штанг

- элементы фидерного тракта;
- опоры для рефлекторов, представленной на рисунке 13;

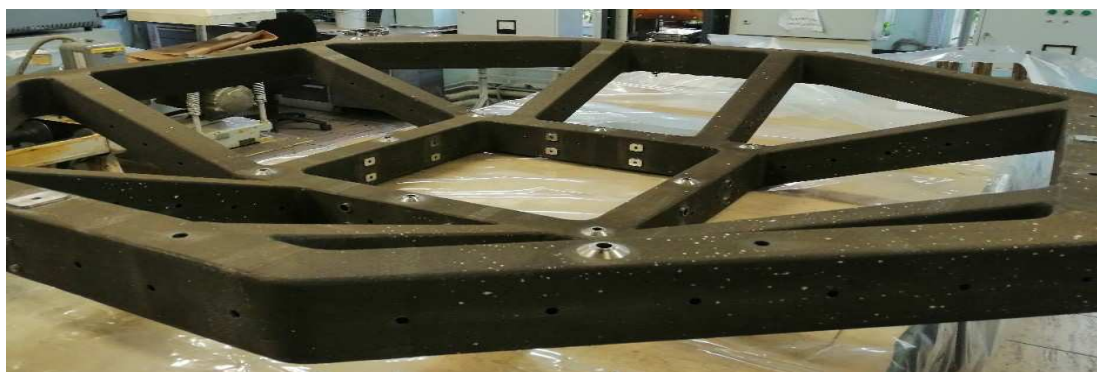


Рисунок 13 – Опора для рефлектора

- силовые спицы для разворачиваемых зонтичных антенн.

На данный момент разрабатывается большое количество новых конструкций антенн. В связи с этим технология изготовления деталей и элементов конструкций из композиционных материалов становится важной технологической задачей.

### **1.3 Технологические проблемы создания формостабильных композитных конструкций**

Первые попытки изготовить формостабильные конструкции типа высокоточных параболических рефлекторов из композиционных материалов показали, что прямое копирование технологических приемов, применяемых при изготовлении силовых конструкций, не отвечает требованиям к изготовлению высокоточных изделий [12]. Основной причиной являются недостаточно контролируемые параметры технологического процесса – режимы формования и термообработки при отверждении, равномерность температурного и силовых полей, температурные, усадочные и остаточные напряжения и деформации, углы разориентации при выкладке и т.д. Такая сильно выраженная зависимость композиционных материалов от технологических параметров делает необходимым точно определять границы для допустимых отклонений технологических параметров, сужать их, разрабатывать технологические способы, оборудование и оснастку, которые позволят уменьшить отрицательно действующие факторы.

Большое значение имеет стабильность режимов формования и термообработки при отверждении. На этом этапе появляются остаточные термонапряжения и деформации, приводящие к изменению формы и размеров изделия. Процесс отверждения, состоящий из нагрева и охлаждения оснастки и изделия – основная причина появления в изделии остаточных напряжений и деформаций (короблений) после его изготовления.

В последнее время при изготовлении космических конструкций из композиционных материалов используют критерий снижения себестоимости. Стоимость доставки конструкций из углепластика примерно на 70 % меньше, стоимости доставки алюминиевых конструкций. Еще одна составляющая себестоимости — это трудоемкость ручной выкладки материала. Сейчас создаются высокопроизводительные машины для выкладки и формования материала методами непрерывной выкладки. Они позволяют повысить

производительность труда в 5-7 раз. Также влияют на себестоимость сборочные работы. При совмещении процессов формования со сборкой в не отверждённом или полукотвержденном состоянии и последующим совместным отверждением, отпадает необходимость в выполнении механических соединений. Это привело к разработке интегральных конструкций, позволяющих уменьшить число входящих в конструкцию элементов.

В связи с разработкой и внедрением композиционных материалов в технологию создания формостабильных композитных конструкций появляется необходимость развития новых методов расчета, проектирования, изготовления и испытаний. Создание эффективных математических моделей материала и элементов конструкции, методов их решения является основной проблемой при создании формостабильных конструкций из композиционных материалов. Особенно остро эта проблема стоит при проектировании крупногабаритных космических конструкций, к которым предъявляются технические и технологические требования, вызванные наличием механических нагрузок, термических напряжений, ограничениями по массе и размерам.

#### **1.4 Факторы, связанные с особенностью технологии изготовления прецизионных конструкций**

К конструкциям космического назначения предъявляются очень жесткие требования[13]– получение в процессе изготовления и сохранение при эксплуатации теоретической поверхности с заданной степенью точности при возрастающих геометрических размерах изделий;

- высокий коэффициент трансформируемости конструкции, простота сборки и разборки;
- жесткость конструкции, малые объемы и масса;
- обеспечение эксплуатационной стабильности конструкции;
- высокий уровень технологичности конструкции.

Термоформостабильность зависит от жесткости конструкции, которая должна сохраняться при эксплуатационных воздействиях силового и температурного характера, меняющихся в широком диапазоне их значений.

К факторам влияния на формостабильность прецизионных конструкций относятся:

- коэффициент линейного температурного расширения;
- удельная жесткость;
- удельная прочность;
- коэффициент теплопроводности;
- силовая схема несущей конструкции и ее влияние на температурную формостабильность;
- вид соединений между элементами конструкции;
- особенности технологических процессов, применяемых при изготовлении конструкции, потенциально возможные точности изготовления;
- изменение физико-механических свойств материала при эксплуатации изделия и возможные пути снижения этого процесса.

### **1.5 Факторы влияния технологических параметров процесса на формостабильность конструкций**

Создание формостабильных конструкций процесс сложный, многоэтапный на каждом этапе существует возможность выбора наиболее оптимального варианта. Только взаимодействие специалистов разных направлений: материаловедов, технологов, испытателей, строгое соблюдение режимов изготовления, использование адекватных физических и математических моделей материала, конструкции и технологического процесса позволит обеспечить реализацию формостабильных характеристик конструкций космических аппаратов.

Выделяют следующие особенности технологии изготовления формостабильных конструкций из композиционных материалов[14]:

- нестабильные характеристики материала;
- отличие физико-механических характеристик материала изделия и оснастки;
- неравномерность процесса полимеризации и, как следствие, возникновение внутренних напряжений;
- влияние температурных и силовых параметров технологического процесса на возникновение внутренних напряжений;
- влияние погрешности выкладки препрега на получение заданных физико-механических и геометрических свойств изделия.

Технологические параметры, влияющие на формостабильность изделий из композиционных материалов:

1) экстремальный характер зависимости физико-механических характеристик композиционных материалов от времени выдержки и температуры формования;

2) зависимость времени выдержки от химической природы связующего, теплофизических свойств композиционных материалов, его качества, режимов предварительного прогрева, от температуры формования, размеров и формы изделия. Плотность, толщина монослоя, коэффициент армирования и пористости зависят от величины давления;

3) низкая температура отверждения приводит к неполной сшивке полимерного связующего и, как следствие, уменьшению прочности и жесткости. При недостаточном прогреве у связующего уменьшается текучесть, вследствие чего происходит увеличение пористости. Более высокая температура формования вызывает рост внутренних напряжений, что вызывает снижение механической прочности, ударной вязкости, влагостойкости;

4) режим охлаждения нужно выбирать в зависимости от температуры стеклования для достижения минимума остаточных напряжений;

5) высокая скорость нагрева приводит к ухудшению структуры материала, к большому градиенту температур и образованию значительных остаточных напряжений.

## **1.6 Этапы создания конструкций из композиционных материалов**

Преимущества композиционных материалов полностью проявляются лишь при правильном проектировании деталей. Копирование методов расчета и проектирования металлических деталей обычно не приводит к положительным результатам. Применяя композиционные материалы, следует обязательно учитывать их основные отличия от металлов. Эти различия выражаются, прежде всего, в существенной анизотропии физико-механических свойств.

На начальном этапе разработки задаются геометрия конструкции и технические требования к материалу [15,16,17]: величины направления и характер действующих нагрузок, температура и другие специальные требования. На основе этих данных выбирают тип композиционных материалов (органопластик, углепластик, стеклопластик), метод изготовления в соответствии с заданной геометрией (формование, намотка) и формулируют требования к материалу по технологичности. По типу композиционных материалов определяются значения физико-механических характеристик однонаправленного слоя композиционных материалов. По справочным данным или расчетами определяются плотность, модуль упругости, прочность, теплофизические свойства. Исходя из величины и направления действия нагрузки, определяется предварительная суммарная толщина слоев, направление ориентации волокон и способ соединения.

На втором этапе уточняются требования к материалу монослоя композиционных материалов и назначаются предварительные требования к соединению элементов конструкции (несущая способность и ее изменение в процессе работы), на основе схемы армирования, типа соединения, технических требований, которые предъявляют к конструкции, учитывая при этом влияние среды, температуры и т.д. С учетом характера нагружения и вида напряженного состояния, действующего на монослой в композиционных материалах, при помощи уравнений микромеханики композитов, задают такие параметры, как пористость, прочность сцепления волокон с матрицей, степень армирования,



упруго прочностные характеристики волокон и матрицы. На основе этих данных определяют вид поверхностной обработки, характеристика поверхности, текстильная форма наполнителя для армирующих волокон, вязкость, скорость отверждения, жизнеспособность для полимерного связующего. Также устанавливают параметры технологического процесса формования, например, давление, температура и время термообработки, которые позволяют получить материал с необходимым соотношением компонентов и термостабильностью, и здесь же назначают методы контроля качества.

Третий этап предусматривает[18] уточнение схемы армирования с учетом реальной толщины монослоя: ориентацию и количество монослоев, расположение их по толщине материала. Необходимо учитывать требование симметрии ориентации слоев относительно средней плоскости для избежания коробления из-за термических напряжений. Уточняются конструктивные размеры и технологические параметры сборки соединяемых элементов конструкции с учетом напряжений, вызванных усадкой и разностью коэффициентов термического расширения материалов соединяемых деталей при сборке и в процессе эксплуатации. После уточнения схемы армирования и геометрических размеров конструкции проводится расчет напряжений и коэффициентов запаса прочности. Если коэффициенты запаса прочности по некоторым элементам избыточны (недостаточны) или имеет место стремление снизить массу конструкции, изменить частотные характеристики отдельных узлов и агрегатов, прибегают к уточнению схемы армирования. Уточнение можно проводить, меняя количество монослоев, их взаимную ориентацию, заменяя материал отдельных монослоев композита на другой с более подходящими характеристиками.

## 1.7 Факторы, влияющие на выбор материалов и применяемые материалы

Основными факторами, которые влияют на выбор материалов для создания точных и стабильных конструкций, являются:

- снижение массовых характеристик;
- повышение формостабильности.

Снижение массы – общая задача при проектировании КА, повышение формостабильности – частная задача [19]. Традиционными материалами для изготовления конструкций КА являлись сплавы алюминия. Но жесткие требования, которые предъявляются к данным конструкциям (минимальная масса и деформируемость, максимальная жесткость) предусматривает применение таких материалов как композиционные материалы [20]. Ниже в таблице 1 приведены сравнительные характеристики композиционных материалов с алюминиевым сплавом.

Таблица 1 – Характеристики композиционных материалов в сравнении с характеристиками алюминия

Марка материала	Разрушающее напряжение при растяжении $\sigma_B$ , МПа	Модуль упругости при растяжении $E$ , ГПа	Плотность, $\rho$ г/см <sup>3</sup>	КТТР, $\alpha \cdot 10^{-6}$ 1/°C
Стеклопластик	475	22	1,72	6,7
Органопластик	2060	78	1,35	-6,5
Углепластик	1056	138	1,45	0,8

Алюминиевый сплав АМг-6	320	72	2,64	24,6
----------------------------	-----	----	------	------

Из таблицы видно, что наиболее подходящим по своим характеристикам материалом будет органопластик или углепластик. Но углепластики имеют более высокий модуль упругости и обладают минимальным коэффициент линейного температурного расширения в 30 раз меньшим, чем у АМг-6, что значительно повышает термостабильность конструкций [21].

Исходя из всего вышеперечисленного, можно сделать вывод о целесообразности использования композиционных материалов на основе углеродных волокон.

Композиционный материал – это материал, состоящий из двух или нескольких компонентов, которые отличаются по своей природе или химическому составу, где компоненты объединены в единую монолитную структуру с границей раздела между структурными составляющими (компонентами), оптимальное сочетание которых позволяет получить комплекс физико-химических и механических свойств, отличающихся от комплекса свойств компонентов [22]. Композиционные материалы обладают следующими признаками: не встречаются в природе, созданы искусственно, состоят из двух или более компонентов, которые различаются по химическому составу и разделенных выраженной границей, обладают свойствами, отличающимися от составляющих их компонентов, неоднородны в микромаштабе и однородны в макромаштабе, состав, форма и распределение компонентов спроектированы заранее.

Компонент, непрерывный во всем объеме композиционного материала, называется матрицей. Компонент или компоненты прерывистые, разъединенные матрицей, называются арматурой или армирующим компонентом, или, иногда, наполнителем. Понятие «армирующий» означает «введенный в материал с целью изменения его свойств», но не несет в себе однозначного понятия «упрочняющий».

Преимущества композиционных материалов:

- 1) высокие удельные прочность и жесткость;
- 2) низкий коэффициент термического расширения;
- 3) отсутствие резкого снижения прочности при разрушении части конструкции.

Углепластики могут использоваться в интервале температур от минус 150 до плюс 150 °С при нормальном давлении и в условиях вакуума до  $10^{-13}$  мм.рт.ст.

Недостатки композиционных материалов:

- 1) хрупкость;
- 2) малые деформации даже при нагрузках, близких к разрушающим;
- 3) электропроводность (частич. недостаток.);
- 4) существует изменение прочности и жесткости при отклонении направления нагрузки от оси волокна.

Наполнитель, армирующий элемент — составная часть композита нитяной, жгутовой, проволоочной, ленточной или тканевой структуры с известными физико-механическими характеристиками материалов.

Матрица — составная часть композита, обеспечивающая его монолитность и совместную работу всех моноволокон наполнителя.

Связующее — смола, раствор, газ, порошок, расплав, образующие матрицу в процессе изготовления композита.

Кроме общих достоинств, недостатков и характерных особенностей (высокие удельные механические характеристики однонаправленного композиционного материала вдоль направления армирования, низкие механические характеристики однонаправленного композиционного материала при сдвиге и поперек волокон, анизотропия свойств и т.д.), каждый волокнистый пластик в зависимости от типа наполнителя имеет также свои характерные особенности, которые необходимо учитывать при выборе типа материала в зависимости от технических требований, предъявляемых к материалу конструкции.

Из применяемых в настоящее время композиционного материала можно выделить четыре основных типа: боропластики, углепластики, органопластики и стеклопластики.

Углеродные волокна относятся к классу наиболее перспективных армирующих элементов:

- низкая плотность (1,4-1,8 кг/см<sup>3</sup>);
- высокая прочность до 350 кгс/мм<sup>2</sup>;
- высокий модуль упругости (2500-40000 кгс/мм<sup>2</sup>).

Матрица в армированных композициях придает изделию форму и делает материал монолитным. Объединяя в единое целое многочисленные волокна, матрица должна позволять композиции воспринимать различного рода внешние нагрузки – растяжение, изгиб, сдвиг и т.д. В то же время она принимает участие в создании несущей способности композиции, обеспечивая передачу усилий на волокна. Матрице отводится и роль защитного покрытия, предохраняющего волокна от механических повреждений и окисления. Кроме этого матрица должна обеспечивать прочность и жесткость системы при действии растягивающей или сжимающей нагрузки в направлении, перпендикулярном к армирующим элементам[23]. Чем пластичнее матрица, тем меньше допускается толщина прослойки между волокнами и тем больше волокон может быть введено в композиционный материал.

Эпоксидные смолы находятся в 1-м ряду в промышленности пластичных масс. Они термореактивны и после отверждения становятся твердыми негорючими системами. Термореактивные смолы имеют превосходную химическую стойкость, хорошую адгезию (прилипание связующего к наполнителю), очень низкое влагопоглощение и усадку, хорошие электрические свойства и высокую прочность. Присущий им превосходный характер компенсирует более высокую стоимость данной смолы по сравнению с другими системами смол. Ранее применение этих смол ограничивалось областями, где требовались сверхвысокие качества. Однако с развитием видов намотки применение эпоксидных смол расширилось.

Связующее – это вещество или группа веществ, используемых в качестве матрицы в композиционных материалах.

Связующее выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к механическим и физико-химическим свойствам композиционного материала [24]. Основным компонент полимерного связующего – смола. Кроме смолы в состав связующего могут входить: растворители, катализаторы или инициаторы (способствуют их отверждению); пластификаторы, придающие полимеру запас пластичности и упругости; красители(окрашивают материал в нужный цвет); стабилизаторы, предотвращающие распад полимеров под действием светового излучения и повышенных температур. Наиболее важным требованием, предъявляемым к связующему, используемому при изготовлении изделий из композиционных материалов, является требование к его вязкости. Связующее должно быть жидким и обладать низкой технологической вязкостью. От вязкости связующего в значительной степени зависит качество пропитки композиционного материала, а отсюда и качество готового изделия.

### **1.8 Методы формования изделий из композиционных материалов**

В практике производства изделий из композиционных материалов применяют большое количество методов формования, отличающихся способом укладки армирующего наполнителя, способом приложения давления и температуры.

Формование – операция придания изделию заданной формы и размеров. Формование можно осуществлять на прессах, контактным, вакуумным, автоклавным методом и намоткой.

Основные методы формования изделий из композиционных материалов:

1 Контактное формование (с прикаткой, безприкатки).

Для изготовления крупногабаритных изделий сложной конфигурации (оболочки, листы больших размеров). Характерные дефекты:

– пористость;

- расслоение;
- участки неполного отверждения;
- разнотолщинность;
- низкое значение физико-механических свойств;
- неравномерное распределение связующего;
- складки.

2 Формование методом намотки (прямая намотка, продольно-поперечная, спирально-винтовая и т.д.).

Для изготовления крупно- и среднегабаритных изделий тел вращения (цилиндрические, сферические, конические и др. оболочки). Характерные дефекты:

- расслоение;
- недостаток связующего в зоне нахлестов наполнителя;
- пористость.

3 Прессование.

Для изготовления средне- и малогабаритных изделий простой формы.

Характерные дефекты:

- трещины;
- расслоения;
- локальная пористость;
- неравномерное распределение связующего.

3 Вакуумное формование.

Для изготовления среднегабаритных изделий простой и сложной формы.

Характерные дефекты:

- складки армирующих слоев;
- неравномерность распределения связующего;
- пористость.

4 Автоклавное формование.

Для изготовления крупно- и среднегабаритных изделий. Характерные дефекты:

- расслоение;
- пористость;
- складки.

#### 5 Викалёмка.

Для изготовления труб малых и средних диаметров изделий обжатием стеклонитью с усилием 0,8-1,5 кгс. Характерные дефекты:

- складки;
- пористость.

#### 6 Термокомпрессионный метод.

Для изготовления изделий сложной конфигурации с использованием эластичного формующего элемента (резины). Характерные дефекты:

- складки;
- пористость;
- расслоение.

Формование является ответственным этапом технологического процесса изготовления изделия. При формовании изделий из композиционных материалов формируются заданные физико-механические свойства, структурные параметры материала, схемы и углы армирования, обеспечиваются геометрические характеристики изделия, которые являются предварительными, так как окончательные характеристики изделия получаются только после отверждения и механической обработки. Выбор того или иного метода формования зависит от габаритных размеров и конфигурации изделия, его назначения и необходимости обеспечения заданных показателей физико-механических свойств материала и изделия

### **1.9 Отверждение композиционных материалов**

Важнейшим технологическим этапом изготовления изделий из композитов является процесс отверждения[25]. Характер отверждения композитов определяется его природой. Процесс отверждения в зависимости от



используемого типа связующего может проходить при нормальной и повышенной температурах. Однако процесс отверждения при нормальной температуре является малопроизводительным, так как время отверждения составляет 1—15 суток. Так, время отверждения полиэфирных связующих может быть уменьшено до 3—10 ч, если отверждение проводить при температуре 80—120° С. При отверждении при нормальной и повышенной температурах полуфабрикат дополнительно нагревается также за счет экзотермической реакции полимеризации; температура при этом может увеличиться до 100—200° С. Поэтому применение высоких температур при отверждении может привести к вспениванию больших масс связующего и растрескиванию материала. Температура горячего отверждения полуфабриката выбирается в зависимости от типа связующего, отвердителя и давления, под которым находится связующее при отверждении.

Температуры отверждения для некоторых видов используемых связующих:

- полиэфирные связующие – (120—140) °С;
- эпоксидные и эпоксифенольные связующие – (135—180) °С;
- кремнийорганические связующие – (250—300) °С.

В настоящее время при отверждении применяют такие методы, как термокамерный, в электромагнитном поле СВЧ, радиационный, ультразвуковой. Однако наибольшее распространение получил термокамерный, как наиболее ранний, хорошо изученный и пригодный практически для всех видов связующих. Остальные методы позволяют значительно интенсифицировать процесс отверждения, уменьшить уровень остаточных напряжений повысить качество изделий, но в настоящее время они находятся в стадии экспериментальной проверки, применимы для определенных видов связующих, но тем не менее они чрезвычайно перспективны и за ними будущее. Наиболее ответственными параметрами, контролируемыми при отверждении, являются:

- температура;

- давление;
- время;
- скорость нагревания и охлаждения;
- степень отверждения;
- кинетика полимеризации (поликонденсации);
- когезионная прочность слоев армирующего материала.

Известно, что адгезионная и когезионная прочность связующих в значительной степени зависит от прикладываемых к ним температуры и давления. Повышенная температура приводит к ускорению расплавления связующего, вследствие чего повышается активность молекул и молекулярных цепей, интенсифицируется процесс полимеризации. Чрезмерное повышение температуры может привести к закипанию связующего и его термодеструкции в полуфабрикате композиционных материалов, что приводит к заметному увеличению числа дефектов, снижению физико-механических характеристик в готовом изделии. При повышении давления в связующем ускоряется процесс образования химических связей, быстрее протекает релаксация усадочных напряжений, обеспечиваются высокие адгезия и когезия связующего, увеличивается прочность и плотность композиционных материалов в готовом изделии.

Верхний предел повышения давления при формовании изделия ограничивается факторами, обусловленными явлениями:

- разрушения и передавливания волокон арматуры;
- усадки и коробления технологической оснастки (оправки);
- разрывами волокон при натяжении армирующего материала при намотке.

При повышенном давлении заметно увеличивается скорость отверждения. Для обеспечения и поддержания высокого давления при отверждении изделий применяют следующие методы:

- автоклавный;
- вакуумный;

- пресс-камерный и др.

Характер изменения температуры в процессе отверждения складывается из трех этапов:

- постепенный подъем температуры при заданной скорости нагревания;
- выдержка при заданной температуре;
- охлаждение с определенной скоростью.

При высокой скорости нагрева связующее быстро расплавляется и выходит на поверхность изделия, что приводит к неравномерному перераспределению содержания компонент в изделии и заметному снижению содержания связующего. Поэтому скорость нагрева должна быть совмещена со скоростью полимеризации, т. е. процесс уменьшения вязкости связующего при его расплавлении и процесс полимеризации должны протекать одновременно с примерно одинаковыми скоростями. В этих условиях будет обеспечена такая вязкость, при которой не будет наблюдаться диффузия связующего на поверхность изделия. Однако из-за низкой теплопроводности полуфабриката в нем возникают значительные температурные градиенты, которые вызывают температурные напряжения, которые приводят к обрыву еще недостаточно прочных молекулярных связей (когезии) в частично отвержденном связующем. Оптимальную скорость нагрева определяют экспериментально, при этом для каждого вида связующего и композиционного материала его значение подбирается отдельно.

Время выдержки изделия при заданной температуре и давлении определяется временем, необходимым для полного завершения процессов полимеризации (поликонденсации) связующего в полуфабрикате. Практикой производства изделий из композиционных материалов установлено, что время полимеризации в зависимости от вида связующего, параметров режима отверждения и габаритов изделия составляет 3—12 ч. Излишняя передержка изделия после завершения полимеризации приводит к образованию различных дефектов (пористости, трещин, расслоений), снижению физико-механических характеристик. Недостаточная выдержка приводит к недоотверждению

изделия, снижению физико-механических характеристик (прочности, жесткости и др.). При охлаждении изделия наиболее важно подобрать оптимальную скорость охлаждения. Физических ограничений для нижнего предела скорости охлаждения не имеется, если это позволяет производительность производства изделий. При охлаждении изделия вследствие различия коэффициентов теплового расширения связующего и наполнителя в отвержденном композиционных материалов будут возникать термические напряжения, при более повышенной скорости охлаждения интенсивность образования этих напряжений будет также возрастать, что может привести к внутренним разрушениям (растрескиванию связующего, разрывам волокон, образованию межслоевых расслоений и др.), короблению изделий. Опытным путем установлено, что охлаждение изделия внутри камеры до 60° С должно проходить при скоростях 0,5—1,0° С/мин, а затем, охлаждение может проходить естественным путем на открытом воздухе.

Следует отметить, что изменчивость всех внешних (температура, давление и др.), а также внутренних (содержание отвердителя, инициаторов и др.) воздействующих факторов приводит к изменению кинетики процесса полимеризации (поликонденсации), скорость - которой в конечном итоге определяет формирование физико-механических свойств материала и изделия в целом.

Таким образом, на стадии отверждения весьма важным является обеспечение контроля следующих параметров:

- 1) скорости нагрева;
- 2) температуры отверждения (выдержки);
- 3) времени отверждения (выдержки при заданной температуре);
- 4) давления, прикладываемого к изделию при отверждении;
- 5) скорости охлаждения.

Анализ вышеприведенной литературы показывает, что технология изготовления деталей из композиционных материалов – процесс сложный, многофакторный, требующий контроля на каждом этапе изготовления.

Разработка новых методов изготовления композитных материалов требует учитывать все технологические факторы влияния на физико– химические свойства готового изделия. Для успешного внедрения новых технологий необходима совместная работа конструкторов, технологов, материаловедов, испытателей.

[изъято 45 страниц]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время композиционные материалы на полимерных и металлических матрицах находят всё более широкое применение в различных отраслях промышленности в качестве конструкционных материалов. Внедрение композиционных материалов обусловлено стремлением использовать их преимущества по сравнению с традиционно используемыми металлами и сплавами. Уникальность композиционных материалов проявляется в их высоких значениях удельной жесткости (отношения модуля упругости к плотности) и удельной прочности (отношения предела прочности к плотности), химической и коррозионной стойкости к агрессивным средам, анизотропии свойств и возможности их варьирования для наилучшего восприятия действующих нагрузок. Внедрение композиционных материалов в конструкцию различных агрегатов и узлов позволяет снизить массовые характеристики изделия, увеличить ресурс и срок службы, уменьшить издержки, связанные с обслуживанием композитных конструкций в эксплуатации.

В данной работе была разработана технология изготовления деталей из композиционных материалов сложной замкнутой формы с применением технологии вытравляемой оснастки и поэтапной полимеризацией. Для этого были проведены следующие работы:

- 1) подтверждена возможность применения режима с неполной предварительной полимеризацией;
- 2) определено влияние процесса вытравливания алюминиевых оправок на физико-механические свойства углепластика;
- 3) отработана технологии изготовления деталей из композиционных материалов замкнутой формы;
- 4) определены значения физико-механических характеристик материала опоры.

Изготовление деталей из композитов сложной замкнутой формы с применением технологии вытравливания оснастки и предварительной полимеризацией возможно.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Акишин, А. И., Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов / А. И.Акишин, Л. С.Новиков // Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия».Знание. – Москва: 1983. – № 4. –64 с.: ил.
- 2 Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов: научное издание /Г.А.Молодцов, В.Е. Биткин, В.Ф. Симонов, Ф.Ф. Урмансов.– Москва.Машиностроение,2000. –352 с.ил.
- 3 Гуцин, В.Н. Основы устройств космических аппаратов: учебник для вузов/ В.Н. Гуцин.–Москва: Машиностроение,2003. – 272с.
- 4 Космические аппараты: учебник /В.Н. Бобков [и др.]. – Москва: Воениздат,1983. –319с.
- 5 Максимов, Г.Ю. Теоретические основы разработки космических аппаратов: учебное пособие. –Москва: Наука,1980. – 320с.
- 6 Тестоедов, Н.А. Технология производства космических аппаратов: учебник /Н.А. Тестоедов, М.М. Михнев, А.Е.Михеев. – Красноярск: Сиб.гос.аэрокосмч.ун-т., 2009. – 352с.
- 7 Чеботарев, В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. пособие /В.Е Чеботарев, В.Е. Косенко. – Красноярск: Сиб.гос.аэрокосмч.ун-т.– 2011. – 488с.,[24] с. ил.
- 8 Академик Михаил Федорович Решетнев / А.Г. Козлов [и др.]. – Железногорск: Науч.-произв.об-ние прикл. Механики, 2006. –334с.
- 9 АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» [Электронный ресурс]: космические аппараты //Официальный сайт компании «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева». – Режим доступа: <http://www.iss-reshetnev.ru>.
- 10 Туманов, А.В.Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов: учеб. пособие/А.В.Туманов, В.В. Зеленцов, Г.А. Щеглов.– Москва: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2010 – 344, с. ил.

11 Кочержский, Г.Н. Антенно-фидерные устройства: учебник для вузов / Г.Н. Кочержский. – Москва: Радио и связь, 1981. – 280с.

12 Харченко, М. Е. Обзор и анализ состояния разработки формостабильных композитных конструкций космического назначения / М. Е. Харченко // Системні технології. /Регіональний міжвуз. зб. наук. праць.– Дніпропетровськ, – 2013. – №4(87), – С. 180 – 186.

13 Банщикова, М.Н. Совершенствование технологии изготовления изделий из полимерных композиционных материалов на основе анализа кинетики процессов/ М. Н. Банщикова, Е. А. Жирнова // Материалы XVIII Международной научно–технической конференции «Решетневские чтения». – 2014. –Т.1, –С. 382–383.

14 Гуняев, Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов: учебное пособие / Гуняев Г.М. – Москва: Химия, 1981, – 232 с.

15 Брызгалин, Г.И. О многоцелевом проектировании волокнистых композитных материалов /Г.И. Брызгалин, С.Д. Копейкин // “Механика композитных материалов”. – 1980.– № 33.– С. 404-408.

16 Тамуж, В.П. Проблемы механики композитных материалов / В.П. Тамуж, Г.А. Тетерс // “Механика композитных материалов”. – 1979. – №1. – С. 34-45.

17 Шатров, А.К. Расчет на прочность и проектирование элементов конструкций из композиционных материалов: учеб. пособие / А. К. Шатров, Л.А. Доставалова, В. Н. Наговицин. – Красноярск: Сибирского Государственного аэрокосмического университета, 2005. – 76 с.

18 Вышванюк, В.И. Тепловое расширение гибридных однонаправленных композитных материалов с малым температурным коэффициентом линейного расширения / В.И. Вышванюк, В.Т. Алымов // Механика композитных материалов. – 1985. – № 2. – С. 357 – 360.

19 Плуме, Э.З. Термическое деформирование композита, армированного гибридными ткаными лентами / Э.З. Плуме, В.М. Пономарев // Механика композитных материалов. – 1988. – №3. – С.392 – 401.

20 Кирулис, Б.А. Методика проектирования оптимальной структуры несущих стержней из углепластика с учетом термического расширения / Б.А. Кирулис // Механика композитных материалов. – 1982. – № 3.–С. 61 – 67.

21 Структура и свойства композиционных материалов: учебник /К.И. Портной, С.Е. Салибеков, И.Л.Светлов, В.М. Чубаров. – Москва:Машиностроение,1979. –255 с.

22 Карпинос, Д.М. Композиционные материалы: справочник/ под ред.Д.М. Карпиноса. – Киев: Наукова думка, 1985. – 592 с.

23 Любин, Дж. Справочник по композиционным материалам: в 2 т. / Под ред. Дж.Любина. – Москва. Машиностроение, 1988. – Т.1. – 448 с.

24 Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник для вузов /И.М. Буланов, В.В. Воробей.– Москва: МГТУ им.Н.Э. Баумана,1998. – 516 с.

25 Колесников, А.В. Моделирование внешнего теплообмена космических аппаратов: монография / А.В. Колесников, В.И. Сербин. – Москва: «Информация – XXI век»,1997. – 170 с.

26 Данилов, Е.Н. Применение современных технических решений в технологии производства прецизионных рефлекторов. /Е.Н.Данилов, М.М. Михнев, Е.В. Патраев, В.Е. Чичурин// трудыVOбщероссийской молодежной науч.-техн. конф. «Молодежь. Техника. Космос» / Балт. гос. техн. ун-т.; Библиотека журнала "ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ. – Санкт-Петербург. 2013. – №17. – С.280 – 285.

27 Кочеткова, С.С. Силовая рама как элемент конструкции крупногабаритного рефлектора/ С.С. Кочеткова, В.Е. Чичурин, В.В. Лайзан, В.В. Болгов, В.Б. Тайгин // Материалы XXII Международной научно–технической конференции «Решетневские чтения». – Красноярск. 2018. – Т.1. – С. 131–132.


28 Батаев, А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учебник / А.А. Батаев, В.А. Батаев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
институт  
Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

  
подпись

В.Е. Косенко

инициалы, фамилия

« 17 » ИЮНЯ 2019 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

«Технология изготовления деталей и сборочных единиц из композиционных материалов для антенн многофункциональных космических аппаратов»

тема

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

код и наименование направления

15.04.05.02 «Технология космических аппаратов»

код и наименование магистерской программы

Научный  
руководитель

  
подпись, дата

доцент МБК ПФиКТ  
канд. физ.-мат. наук  
должность, ученая степень

А.А. Хвалько  
инициалы, фамилия

Выпускник

  
подпись, дата

С.С. Кочеткова  
инициалы, фамилия

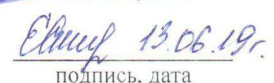
Рецензент

  
подпись, дата

начальник группы,  
цех 039 АО «ИСС»  
должность, ученая степень

В.Е. Чичурин  
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

  
подпись, дата

Е.С. Сидорова  
инициалы, фамилия

Красноярск 2019